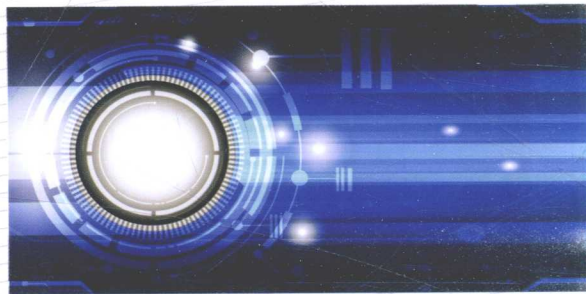


刘宏哲 袁家政 郑永荣◎著



计算机视觉算法 与智能车应用



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

计算机视觉算法与智能车应用

刘宏哲 袁家政 郑永荣 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书介绍计算机视觉在智能车中的应用,分三个部分共13章。第一部分(第1、2章),供初学者学习,介绍计算机视觉的定义、研究内容、发展历程、在智能车中的主要应用,以及智能车视觉常用的图像预处理方法。第二部分(第3~5章),是智能车视觉技术的基础内容,介绍智能车视觉认知硬件平台和软件开发环境的搭建与配置,以及在实际应用中经常使用的摄像机标定方法和视觉测距技术。第三部分(第6~13章),介绍计算机视觉在智能车中的具体应用和问题解决,包括车道线的识别与跟踪、停止线检测与测距、斑马线、导向箭头、交通信号灯、交通标志牌等识别方法和视觉定位技术,使读者进一步了解智能车视觉的具体应用,以及解决问题的难点和思路。

本书适合从事计算机视觉、图像处理、智能车研究的人员学习,尤其适合从事无人驾驶智能车图像处理研究和开发的人员学习,也可作为相关专业研究生的教学用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

计算机视觉算法与智能车应用 / 刘宏哲, 袁家政, 郑永荣著. —北京: 电子工业出版社, 2015.12
ISBN 978-7-121-27977-5

I. ①计… II. ①刘… ②袁… ③郑… III. ①计算机视觉—应用—汽车—模型(体育)—制作
IV. ①G872.1-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 318963 号

责任编辑: 许存权

特约编辑: 刘丽丽 刘 双

印 刷: 三河市双峰印刷装订有限公司

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 720×1 000 1/16 印张: 11.75 字数: 263 千字

版 次: 2015 年 12 月第 1 版

印 次: 2015 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 56.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

无人驾驶智能汽车是未来汽车的发展趋势，以谷歌为代表的无人车研究，在全世界范围内取得了一定的成果，国内也有不少学者和机构开展智能车的研究。计算机视觉是智能车技术的重要组成部分，本书主要介绍了计算机视觉在智能车中解决的问题及方法。

计算机视觉在智能车中应用广泛，理论上可以解决很多无人驾驶过程中遇到的实际问题，但由于目前计算机视觉技术水平有限，加上雷达、GPS 导航等传感器设备在智能车上应用，因此，目前实际应用中只通过计算机视觉解决其他传感器难以解决的科学和工程问题，如车道线检测、停止线检测、红绿灯识别等。随着智能车产业化进程的临近，由于智能车研发中视觉传感器所需要的设备成本较低，因此，用计算机视觉来解决智能驾驶中遇到的问题成为目前和未来的发展趋势。

本书介绍智能车视觉计算的理论和方法，目的是让读者对智能车的视觉图像研究得到快速入门，以解决智能车基本视觉问题为出发点，激发读者对智能车视觉研究的兴趣，为更加深入的研究做基础，为解决实际应用问题提供研究思路。

本书读者，可以是从事计算机视觉、机器视觉、图像处理、视觉感知、人工智能和智能车研究的学者，尤其是从事无人驾驶智能车图像处理的研究和开发人员。同时，本书也可以作为相关专业的研究生教学用书。无人驾驶智能车中的很多视觉问题既是世界性难题又是开放的科学问题，期望有更多人加入到智能车视觉研究中来。

本书共 13 章，其中第 1、2 章的内容是介绍性的，主要介绍计算机视觉的定义、研究内容、发展历程、在智能车中的主要应用，以及一些智能车视觉常用的图像预处理方法，这是为初学者准备的；第 3~5 章的内容是基础篇，主要介绍智能车视觉认知的硬件平台和软件开发环境的搭建与配置，以及在实际应用中经常使用的摄像机标定方法和视觉测距技术，适合刚刚从事智能车视觉研究的人员学习，以便快速入门；第 6~13 章的内容是具体应用，本书以智能车实际需要的重要程度及难易

程度分别介绍车道线的识别与跟踪、停止线检测与测距、斑马线、导向箭头、交通信号灯、交通标志牌等识别方法及视觉定位技术，让读者进一步了解智能车视觉的具体实际应用及每个问题解决的难点和思路。

本书中的很多实验是在北京联合大学智能车“京龙1号”、“京龙2号”和“京龙3号”的平台上完成的，其中部分实验数据来源于2014年和2015年的中国智能车未来挑战赛、2015年智能驾驶郑开大道试验及园博园测试场地的实际交通道路。

本书受到国家自然科学基金重大研究计划项目“智能车驾驶脑认知技术、平台与转化研究”(91420202)、北京市属高等学校创新团队建设与教师职业发展计划项目“智能驾驶技术研究”(IDHT20140508)、北京市教育委员会科技发展计划项目“智能车实时交通标志识别关键技术研究”(SQKM201411417004)、北京联合大学人才强校计划人才资助项目(BPHR2014A04)的资助。撰写过程中得到了李德毅院士智能车联合课题组成员的很多指导，感谢他们的宝贵意见。感谢本团队参与人员的共同努力和辛苦劳动，特别是研究生周宣汝、王棚飞、李超、宣寒宇等同学，潘卫国、王金华等老师，以及海丹博士为本书的撰写收集和整理相关资料。在本书的撰写过程中，参阅了大量文献和资料，在此向这些文献资料的作者致以衷心的感谢。感谢在此未明确提及但对本书出版贡献的朋友。

由于作者水平有限，书中的错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

作者

2015年10月

目 录

第 1 章 计算机视觉简介	1
1.1 计算机视觉的发展历程	1
1.2 计算机视觉研究现状	2
1.3 计算机视觉在智能车的应用	3
第 2 章 视觉预处理技术	7
2.1 灰度化处理	7
2.2 颜色空间变换	8
2.2.1 RGB 颜色空间	8
2.2.2 HSV 颜色空间	9
2.2.3 RGB 与 HSV 相互转换	10
2.3 阈值处理	12
2.3.1 全局阈值处理方法	13
2.3.2 局部阈值处理方法	14
2.3.3 自适应阈值处理方法	14
2.4 霍夫变换	15
2.5 平滑滤波	16
2.5.1 邻域平滑滤波	16
2.5.2 中值滤波	18
2.6 边缘检测	19
2.6.1 Canny 算子边缘检测	20
2.6.2 Sobel 算子边缘检测	21
第 3 章 智能车视觉平台搭建	24
3.1 硬件平台的设计与搭建	24
3.1.1 硬件平台的设计	24
3.1.2 硬件平台的搭建	27

3.2	开发环境的搭建	29
3.2.1	开发工具介绍	29
3.2.2	OpenCV 下载与安装	29
3.2.3	环境配置	30
第 4 章	标定	39
4.1	摄像机标定方法	39
4.1.1	摄像机成像模型	39
4.1.2	摄像机内外参数	40
4.1.3	机器视觉标定板说明	41
4.1.4	单目摄像机标定	43
4.2	逆透视标定方法	45
4.2.1	逆透视变换原理	45
4.2.2	传统的逆透视标定方法	46
4.2.3	一种用于智能车的逆透视标定方法	47
4.2.4	逆透视图像的特点及应用	51
第 5 章	单目视觉测距	53
5.1	基于映射关系表的单目视觉测距	53
5.1.1	方法的实现	53
5.1.2	实验结果	55
5.1.3	等距标记的优缺点	56
5.2	基于几何关系的距离计算方法	56
5.2.1	方法的实现	56
5.2.2	实验与结果分析	62
5.3	基于逆透视变换的平面测距方法	65
第 6 章	车道线检测与跟踪	67
6.1	车道线检测方法	67
6.1.1	车道线特性及类型	67
6.1.2	国内外近年研究成果	68
6.1.3	车道线检测的难点	69
6.1.4	自适应二值化算法	69
6.2	基于透视图像的检测方法	73
6.2.1	透视模型	73

6.2.2	一种基于透视图像的车道线检测方法	76
6.3	基于 IPM 的检测方法	79
6.3.1	逆透视模型	79
6.3.2	一种基于 IPM 的车道线检测方法	80
6.4	车道虚拟中心线的计算方法	86
6.5	车道线跟踪技术	89
6.5.1	基于卡尔曼滤波的车道线跟踪	90
6.5.2	基于粒子滤波的车道线跟踪	90
第 7 章	斑马线识别	92
7.1	斑马线的特征及其作用	92
7.2	斑马线识别方法	94
7.3	基于时空关联的斑马线识别方法	99
第 8 章	停止线识别与测距	103
8.1	停止线的特征及其作用	103
8.1.1	停止线的特征	103
8.1.2	停止线的作用	104
8.2	停止线识别方法	105
8.3	基于时空关联的停止线识别方法	108
8.4	停止线测距	112
第 9 章	导向箭头识别	114
9.1	导向箭头的特征和类型	114
9.2	导向箭头的识别方法	115
9.3	基于时空关联的导向箭头识别方法	116
第 10 章	交通信号灯识别	122
10.1	交通信号灯识别简述	122
10.1.1	交通信号灯识别的意义	122
10.1.2	交通信号灯识别的方法	123
10.2	交通信号灯检测方法	124
10.2.1	颜色空间选取	125
10.2.2	图像分割	126
10.3	交通信号灯识别方法	129
10.3.1	区域选择	129

10.3.2	特征提取	130
10.3.3	分类器训练	132
第 11 章	交通标志牌识别	133
11.1	交通标志牌识别简述	133
11.2	交通标志牌类型	135
11.3	交通标志牌识别现状	139
11.4	交通标志牌识别的难点	140
11.4.1	天气环境的影响	140
11.4.2	空间变化的影响	141
11.5	交通标志牌识别的方法	143
11.5.1	基于模板匹配的方法	143
11.5.2	基于机器学习的方法	146
第 12 章	无人自主车视觉定位	150
12.1	视觉定位的意义和应用	150
12.2	视觉定位方法	152
12.2.1	基于路标库和图像匹配的全局定位	152
12.2.2	同时定位与地图构建的 SLAM	155
12.2.3	基于局部运动估计的视觉里程计	156
12.3	定位算法性能分析	159
第 13 章	基于视觉的路口定位	161
13.1	路口定位的实现流程	161
13.2	基于路口场景识别的粗定位	162
13.2.1	建立路口场景特征库	162
13.2.2	基于 SURF 的快速路口场景识别	164
13.3	基于 IPM 的高精度实时定位	166
13.3.1	逆透视变换 (IPM)	166
13.3.2	停止线检测与测距	169
13.3.3	车道线检测	172
13.3.4	位置坐标计算	175
	参考文献	178

第 1 章 计算机视觉简介

1.1 计算机视觉的发展历程

计算机视觉 (Computer Vision, CV) 是一门研究如何使机器“看”的科学, 更进一步说, 就是指利用摄影机和计算机代替人眼对目标进行识别、跟踪和测量等机器视觉 (Machine Vision), 并进一步做图形处理, 让计算机处理成为更适合人眼观察或传送给仪器检测的图像。作为一个科学学科, 计算机视觉研究相关的理论和技术, 试图建立能够从图像或者多维数据中获取“信息”的人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 系统。因为感知可以看作是从感官信号中提取信息, 所以计算机视觉也可以看作是研究如何使人工系统从图像或多维数据中“感知”的科学。

计算机视觉是使用计算机及相关设备对生物视觉的一种模拟。它的主要任务就是通过对采集的图像或视频进行处理以获得相应场景的信息, 就像人类和许多其他类生物每天所做的那样。计算机视觉既是工程领域, 也是科学领域中的一个富有挑战性的研究领域。计算机视觉是一门综合性的学科, 它已经吸引了来自各个学科的研究者参加到对它的研究之中, 其中, 包括计算机科学和工程、信息处理、物理学、应用数学和统计学、神经生理学和认知科学等。

计算机视觉是在 20 世纪 50 年代从统计模式识别开始的, 当时的工作主要集中在二维图像分析和识别上, 如光学字符识别, 工件表面、显微图片和航空图片的分析和解释等。20 世纪 60 年代, 麻省理工学院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT) 的 Roberts 通过计算机程序从数字图像中提取出诸如立方体、楔形体、棱柱体等多面体的三维结构, 并对物体形状及物体的空间关系进行描述, Roberts 的研究工作开创了以理解三维场景为目的的三维计算机视觉的研究。Roberts 对积木世界的创造性研究给人们以极大的启发, 许多人相信, 一旦由白色积木玩具组成的三维世界可以被理解, 则可以推广到理解更复杂的三维场景。

20 世纪 70 年代, 已经出现了一些视觉应用系统, 70 年代中期, 麻省理工学院 (MIT) 的人工智能 (AI) 实验室正式开设“机器视觉” (Machine Vision) 课程,

由 B. K. P. Horn 教授讲授。MIT AI 实验室吸引了国际上许多知名学者参与计算机视觉的理论、算法、系统设计的研究，David Marr 教授就是其中的一位，他于 1973 年应邀在 MIT AI 实验室领导一个以博士生为主体的研究小组，1977 年提出了不同于“积木世界”分析方法的计算视觉理论，该理论在 20 世纪 80 年代成为计算机视觉研究领域中的一个十分重要的理论框架。

研究热潮是从 20 世纪 80 年代开始的，到了 80 年代中期，计算机视觉获得了蓬勃发展，新概念、新方法、新理论不断涌现，例如，基于感知特征群的物体识别理论框架、主动视觉理论框架、视觉集成理论框架等。

自 20 世纪 80 年代以来，计算机视觉的研究已经历从实验室走向实际应用的发展阶段，而计算机工业水平的飞速发展，更是促进了计算机视觉系统的实用化和涉足许多复杂视觉过程的研究。目前，计算机视觉技术正在广泛应用于计算几何、计算机图形学、图像处理、机器人学等多个领域中。

1.2 计算机视觉研究现状

计算机视觉领域的突出特点是其多样性与不完善性。这一领域的先驱可追溯到更早的时候，但是直到 20 世纪 70 年代后期，当计算机的性能提高到足以处理诸如图像这样的大规模数据时，计算机视觉才得到了正式的关注和发展。然而这些发展往往起源于其他不同领域的需要，因而何谓“计算机视觉问题”始终没有得到正式定义，很自然地，“计算机视觉问题”应当被如何解决也没有成型的公式。

尽管如此，人们已开始掌握部分解决具体计算机视觉任务的方法，可惜这些方法通常都仅适用于一群狭隘的目标（如脸孔、指纹、文字等），因而无法被广泛地应用于不同场合。

对这些方法的应用通常作为某些解决复杂问题的大规模系统的一个组成部分（例如，医学图像的处理、工业制造中的质量控制与测量）。在计算机视觉的大多数实际应用当中，计算机被预设为解决特定的任务，然而基于机器学习的方法正日渐普及，一旦机器学习的研究进一步发展，未来“泛用型”的电脑视觉应用或许可以成真。

人工智能所研究的一个主要问题是如何让系统具备“计划”和“决策能力”？从而使之完成特定的技术动作（例如，移动机器人通过某种特定环境）。这一问题便与计算机视觉问题息息相关。在这里，计算机视觉系统作为一个感知器，为决策

提供信息。另外，一些研究方向包括模式识别和机器学习（这也隶属于人工智能领域，但与计算机视觉有着重要联系），也由此，计算机视觉时常被看作人工智能与计算机科学的一个分支。

物理是与计算机视觉有着重要联系的另一领域。计算机视觉关注的目标在于充分理解电磁波——主要是可见光与红外线部分——遇到物体表面被反射所形成的图像，而这一过程便是基于光学物理和固态物理，一些尖端的图像感知系统甚至会应用到量子力学理论，来解析影像所表示的真实世界。同时，物理学中的很多测量难题也可以通过计算机视觉得到解决，如流体运动。因此，计算机视觉同样可以被看作是物理学的拓展。

另一个具有重要意义的领域是神经生物学，尤其是其中生物视觉系统的部分。在整个 20 世纪中，人类对各种动物的眼睛、神经元，以及与视觉刺激相关的脑部组织都进行了广泛研究，这些研究得出了一些有关“天然的”视觉系统如何运作的描述，这也形成了计算机视觉中的一个子领域——人们试图建立人工系统，使之在不同的复杂程度上模拟生物的视觉运作。同时在计算机视觉领域中，一些基于机器学习的方法也有参考部分生物机制。

计算机视觉的另一个相关领域是信号处理。很多有关单元变量信号的处理方法，尤其是对时变信号的处理，都可以很自然的被扩展为计算机视觉中对二元变量信号或者多元变量信号的处理方法。但由于图像数据的特有属性，很多计算机视觉中发展起来的方法，在单元信号的处理方法中却找不到对应版本。这类方法的一个主要特征，便是它们的非线性及图像信息的多维性，以上二点作为计算机视觉的一部分，在信号处理学中形成了一个特殊的研究方向。

除了上面提到的领域，很多研究课题同样可被当作纯粹的数学问题。例如，计算机视觉中的很多问题，其理论基础便是统计学、最优化理论及几何学。

1.3 计算机视觉在智能车中的应用

随着计算机视觉技术的成熟和无人驾驶智能汽车技术的不断发展，计算机视觉已应用在智能车系统中，并且发挥着重要的甚至不可替代的作用。智能车视觉系统与传感器如图 1-1 所示。计算机视觉在智能车的应用主要有三方面，分别是交通标识识别、障碍物检测及视觉定位导航，如图 1-2、图 1-3 和图 1-4 所示。在无人驾驶过程中需要识别的交通标识有交通信号灯（红绿灯）、交通标志牌、车道线、停

止线、斑马线、导向箭头，其中最关键的是车道线、停止线和红绿灯，而障碍物检测主要是行人检测和车辆检测。

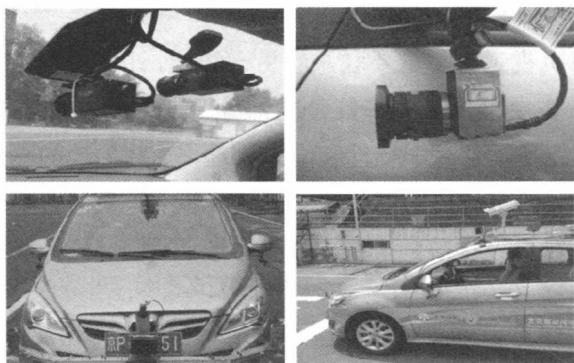


图 1-1 智能车视觉传感器

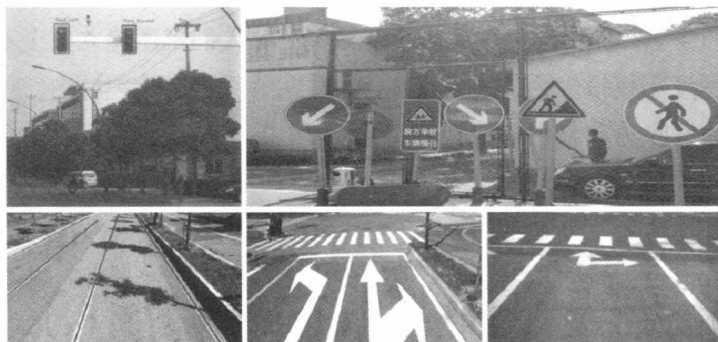


图 1-2 基于视觉的交通标识识别



图 1-3 基于视觉的障碍物检测

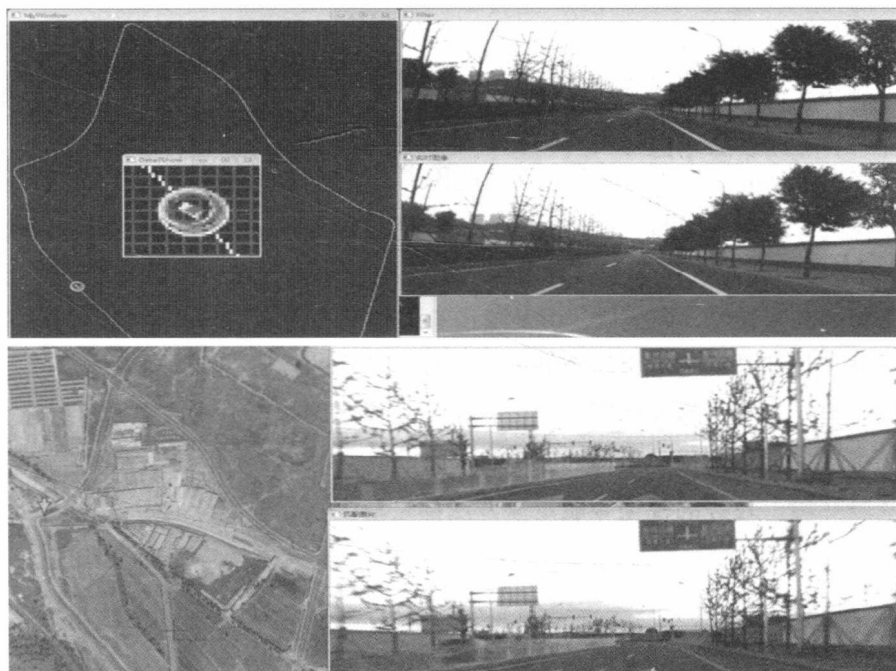


图 1-4 视觉导航定位技术

交通标识识别。在智能车的无人驾驶过程中需要通过视觉感知周边环境中的各种交通标识,就像人开车的时候需要时刻关注的各种交通标识,如红绿灯、交通牌、导向箭头、停止线等。但是智能车识别这些交通标识的目的和人开车时关注这些标识的目的不同,这些标识对人来说只是一种辅助,而对智能车来说是一种引导,两者是有区别的,例如,人可以不看车道线驾驶而智能车在没有 GPS 导航的情况下只能寻车道线行驶。对智能车而言,以上的所有交通标识识别最为重要的是车道线识别和停止线识别与测距,其他的交通标识都可以通过其他方式解决。车道线识别的目的是为了让智能车寻着车道线行驶,而停止线识别与测距的目的是为了让智能车在路口安全停车。红绿灯对智能车固然重要或者说必不可少,但是利用视觉进行红绿灯识别代价很高并且很难做到鲁棒实时,而采用射频技术则可以很容易解决这个问题。交通标志牌、斑马线、导向箭头作为静态交通标识内容位置一般都是固定的,所以可以将这些标识作为实验知识,做到用于无人驾驶智能车的高精度地图中,智能车到了附近自然就知道周边有什么交通标识了。

障碍物检测。智能车在无人驾驶过程中,除了需要导航引导外,还需要时刻感知车身周边的障碍物信息,如道路上的行人、车辆,以及马路边沿、栏杆等。虽然现在有很多关于基于视觉的行人检测、车辆检测的研究,以及基于图像分割的可行

驶区域计算方法，但是毕竟不够成熟，其实时性、鲁棒性和准确性都难到达智能车的实际要求，然而这些问题对激光雷达、毫米波雷达来说确实是很简单的事情，因此，在智能车系统中有专门的雷达负责检测行人、车辆及马路沿等。

视觉导航定位。在智能车无人驾驶过程中需要实时知道自身位置及目标地的位置，这就需要导航定位技术。现在流行的导航定位技术是 GPS+惯导组合定位或者北斗+惯导组合定位，不管是哪种卫星导航定位技术都存在一个致命的缺点，在多云、密集的高建筑物、高架桥，以及隧道等遮挡时会丢失信号及定位误差很大。而视觉导航定位就是解决卫星这个缺陷及其成本昂贵的问题。现有的视觉定位方法可以分为三类：基于路标库和图像匹配的全局定位、同时定位与地图构建的 SLAM、基于局部运动估计的视觉里程计。其中全局定位、SLAM 定位都不太适合智能车的实际驾驶环境，较好的视觉导航定位方法都是基于视觉里程计的定位。

第2章 视觉预处理技术

2.1 灰度化处理

在对道路图像进行阈值处理之前，我们需要先对原始的 RGB 图像进行灰度化处理，即格式由 RGB 颜色空间转换成灰度图像。RGB 图像转灰度图像的一般公式如下：

$$\text{Gray} = 0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B$$

其中， R 、 G 、 B 分别是红色、蓝色和绿色通道，其范围为 $[0 \sim 255]$ 。然而这种灰度化处理方法将会丢失大量颜色信息。为了增强灰度效果采用了以下方法，公式如下：

$$I = R + G - B$$

但是，车道线的颜色一般是白色（255,255,255）和黄色（255,255,0），如果使用以上公式对黄色进行灰度化的话，那么 $I = 255 + 255 - 0 = 510 > 255$ ，显然这种方法对某些颜色具有不合理性。因此，为了增强地面交通标识（车道线、斑马线、停止线、导向箭头）的特征信息，我们会采用以下方法，公式如下：

$$I = 0.5 \times (R + B)$$

这种方法可以增强车道线等标识的灰度值质量，因此可以提高图像处理的准确性。

在图 2-1 中左上方的图像是原始 RGB 图像，其中有白色实线和黄色实线，以便测验灰度算法的适用性；右上方的图像是采用 $\text{Gray} = 0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B$ 的方法进行灰度处理，可以发现黄色实线部分的灰度值偏低比较暗，不利于黄色车道线的检测；左下方的图像是采用 $I = R + G - B$ 的方法进行灰度化处理的结果，可以发现黄色实线部分的灰度值很高很亮，我们在其基础上做了边界处理，当大于 255 时为 255，而小于 0 时为 0，以防止出错。虽然这种处理方法可以使白色、黄色车道线增强，但是同时将整个图像亮度提高了，对边缘提取和阈值处理带来一定的噪声；右下方的图像是采用 $I = 0.5 \times (R + B)$ 的方法进行灰度化处理的结果，对车

道线具有比较好的显示，同时又不增强图像亮度，比较真实反映路面信息。

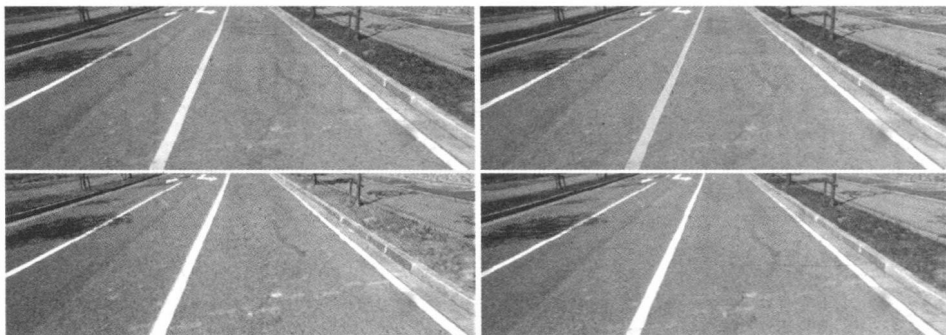


图 2-1 三种灰度处理方法的效果

2.2 颜色空间变换

颜色空间又称彩色模型（彩色空间或彩色系统），它的用途是在某些标准下用通常可接受的方式对彩色加以说明。本质上，彩色模型是对坐标系统和子空间的阐述。位于系统中的每种颜色都有单个点表示。采用的大多数颜色模型都是面向硬件或面向应用的。颜色空间从提出到现在已经有上百种，大部分只是局部的改变或专用于某一领域。颜色空间按照基本结构可以分两大类：基色颜色空间（RGB）和色、亮分离颜色空间；在智能车视觉图像预处理中常用的有 RGB、HSV。

2.2.1 RGB 颜色空间

RGB 色彩模式是工业界的一种颜色标准，是通过对红（R）、绿（G）、蓝（B）三个颜色通道的变化，以及它们相互之间的叠加来得到各式各样的颜色的，RGB 即代表红、绿、蓝三个通道的颜色，这个标准几乎包括了人类视力所能感知的所有颜色，是目前运用最广的颜色系统之一。需要向大家声明的是，OpenCV 默认的图片通道是 BGR，使用时只需将 RGB 转成 BGR 就可以正常显示了。RGB 图像与 BGR 图像的区别如图 2-2 所示。

RGB 色彩模式使用 RGB 模型为图像中每一个像素的 RGB 分量分配一个 0~255 的强度值。RGB 图像只使用三种颜色，就可以使它们按照不同的比例混合，在屏幕上呈现 $16\,777\,216$ ($256 \times 256 \times 256$) 种颜色。